مرکز دانش شبکه خبرگان صنعت فولاد

فولاد کم‌کربن از کجا آغاز می‌شود؟ مقایسه مسیرهای BF-BOF، DRI-EAF و H -DRI

مقالات تخصصی | ۱۴۰۵/۰۵/۰۵ | admin

کاهش انتشار کربن در صنعت فولاد فقط با تعویض یک سوخت یا نصب یک تجهیز جدید محقق نمی‌شود. مسیر تحول به نوع مواد اولیه، فناوری موجود، دسترسی به برق کم‌کربن، کیفیت سنگ‌آهن، قیمت گاز و هیدروژن و حتی عمر تجهیزات کارخانه وابسته است. این مقاله سه مسیر اصلی تولید فولاد را بررسی می‌کند و نشان می‌دهد چرا واحدهای مبتنی بر احیای مستقیم و کوره قوس الکتریکی، به‌ویژه در کشورهایی دارای تجربه DRI، موقعیت متفاوتی نسبت به مجتمع‌های کوره‌بلند دارند.



چکیده

کاهش انتشار کربن در صنعت فولاد فقط با تعویض یک سوخت یا نصب یک تجهیز جدید محقق نمی‌شود. مسیر تحول به نوع مواد اولیه، فناوری موجود، دسترسی به برق کم‌کربن، کیفیت سنگ‌آهن، قیمت گاز و هیدروژن و حتی عمر تجهیزات کارخانه وابسته است. این مقاله سه مسیر اصلی تولید فولاد را بررسی می‌کند و نشان می‌دهد چرا واحدهای مبتنی بر احیای مستقیم و کوره قوس الکتریکی، به‌ویژه در کشورهایی دارای تجربه DRI، موقعیت متفاوتی نسبت به مجتمع‌های کوره‌بلند دارند.

فولاد کم‌کربن از کجا آغاز می‌شود؟

فولاد یکی از پایه‌های توسعه صنعتی است، اما تولید آن همچنان از فعالیت‌های انرژی‌بر و کربن‌بر جهان محسوب می‌شود. انجمن جهانی فولاد اعلام کرده است که در سال ۲۰۲۴ حدود ۱,۸۸۶ میلیون تن فولاد خام در جهان تولید شد و متوسط انتشار گازهای گلخانه‌ای زنجیره تولید، با احتساب دامنه‌های مختلف انتشار، به حدود ۲٫۱۸ تن معادل دی‌اکسیدکربن به ازای هر تن فولاد رسید. مجموع انتشار صنعت نیز حدود ۴٫۱ میلیارد تن برآورد شده است.

این اعداد نشان می‌دهند که «فولاد سبز» صرفاً یک شعار بازاریابی نیست. تغییر فناوری تولید فولاد، در دهه‌های آینده به یکی از مهم‌ترین موضوعات رقابت صنعتی، تأمین مالی، صادرات و دسترسی به بازار تبدیل خواهد شد.

بااین‌حال، یک نسخه واحد برای همه کارخانه‌ها وجود ندارد. انتخاب مسیر مناسب به زیرساخت انرژی، مواد اولیه، فناوری فعلی، ظرفیت سرمایه‌گذاری و شرایط منطقه‌ای هر تولیدکننده وابسته است. انجمن جهانی فولاد نیز تأکید می‌کند که راهبرد گذار هر شرکت باید متناسب با هزینه و دسترسی محلی به انرژی، منابع، حمایت‌های سیاستی و منابع مالی تعیین شود.

سه مسیر اصلی تولید فولاد

برای درک بحث کاهش انتشار، ابتدا باید سه مسیر اصلی تولید فولاد را از یکدیگر تفکیک کرد.

۱. کوره‌بلند و کنورتور اکسیژنی؛ BF-BOF

در مسیر سنتی کوره‌بلند، سنگ‌آهن با استفاده از کک و سایر مواد کربنی احیا می‌شود. آهن مذاب تولیدشده سپس وارد کنورتور اکسیژنی می‌شود تا درصد کربن و ناخالصی‌های آن تنظیم شود.

کربن در این فرایند فقط نقش سوخت ندارد؛ عامل احیای شیمیایی سنگ‌آهن نیز هست. به همین دلیل حذف کامل آن از واحدهای موجود ساده نیست.

بر اساس گزارش IEA در سال ۲۰۲۵، مسیر BF-BOF هنوز حدود ۷۰ درصد تولید فولاد جهان را تشکیل می‌دهد. متوسط شدت انتشار گزارش‌شده توسط worldsteel برای این مسیر در سال ۲۰۲۴ حدود ۲٫۳۴ تن CO به ازای هر تن فولاد خام بوده است؛ با اضافه‌شدن سایر گازهای گلخانه‌ای و انتشار بالادستی، این شاخص به حدود ۲٫۶۶ تن معادل CO می‌رسد.

این مسیر از نظر ظرفیت تولید، بلوغ فناوری و بهره‌وری عملیاتی بسیار قدرتمند است، اما کاهش عمیق انتشار در آن به اقداماتی فراتر از بهینه‌سازی معمول نیاز دارد.

برخی گزینه‌های توسعه‌ای عبارت‌اند از:

- بازیافت گاز بالای کوره؛
- تزریق محدود هیدروژن؛
- استفاده از سوخت‌ها و احیاکننده‌های کم‌کربن؛
- اکسی‌فول و تزریق پلاسما؛
- دیجیتالی‌سازی و کنترل پیشرفته فرایند؛
- جذب، استفاده یا ذخیره‌سازی کربن.

این اقدامات می‌توانند شدت انتشار را کاهش دهند، ولی در بسیاری از موارد برای رسیدن به انتشار نزدیک به صفر کافی نیستند.

۲. احیای مستقیم با گاز طبیعی و کوره قوس؛ DRI-EAF

در مسیر DRI-EAF، سنگ‌آهن بدون ذوب کامل در واحد احیای مستقیم به آهن اسفنجی تبدیل می‌شود. سپس آهن اسفنجی، قراضه و مواد افزودنی در کوره قوس الکتریکی ذوب می‌شوند.

اگر گاز طبیعی عامل احیا باشد، بخش مهمی از کربن به‌جای زغال‌سنگ از متان تأمین می‌شود. این مسیر همچنان بدون کربن نیست، اما معمولاً نسبت به کوره‌بلند انتشار کمتری دارد.

داده‌های worldsteel برای سال ۲۰۲۴ شدت انتشار مستقیم و زنجیره‌ای CO در مسیر DRI-EAF را حدود ۱٫۴۷ تن CO به ازای هر تن فولاد خام نشان می‌دهد. شاخص گسترده‌تر گازهای گلخانه‌ای برای این مسیر حدود ۱٫۶۶ تن معادل CO بوده است.

این ارقام میانگین جهانی هستند. عملکرد واقعی هر کارخانه به عوامل متعددی وابسته است:

- ترکیب گاز احیا؛
- میزان مصرف گاز طبیعی؛
- درصد متالیزاسیون آهن اسفنجی؛
- مصرف انرژی کوره قوس؛
- سهم قراضه در شارژ؛
- منبع تولید برق؛
- کیفیت گندله؛
- میزان کربن آهن اسفنجی؛
- عملکرد بازیافت حرارت و گاز.

برای کارخانه‌ای که از قبل DRI و EAF دارد، مسیر کاهش انتشار لزوماً با تخریب واحدهای موجود آغاز نمی‌شود. ابتدا می‌توان بهره‌وری همین زنجیره را بهبود داد و سپس سهم گاز کم‌کربن یا هیدروژن را افزایش داد.

۳. احیای مستقیم با هیدروژن؛ DRI-EAF- H

در احیای مستقیم هیدروژنی، هیدروژن جایگزین بخش اصلی گازهای کربن‌دار می‌شود. در واکنش احیای اکسید آهن، محصول جانبی به‌جای CO عمدتاً بخار آب است.

این مسیر از نظر فنی یکی از گزینه‌های اصلی فولاد کم‌انتشار محسوب می‌شود، اما موفقیت آن به سه زیرساخت حیاتی وابسته است:

1. هیدروژن کم‌کربن و پایدار؛

2. برق کم‌کربن و ارزان؛
3. مواد اولیه با کیفیت مناسب.

گزارش IEA ۲۰۲۵ مسیر H -DRI-EAF را یکی از گزینه‌های ترجیحی کاهش انتشار در برخی مناطق می‌داند، اما برآورد می‌کند هزینه نخستین واحدهای تجاری مبتنی بر هیدروژن صددرصدی، بسته به منطقه، در شرایط فعلی حدود ۵۰ تا ۱۴۰ درصد بیشتر از مسیر BF-BOF باشد.

بنابراین مسئله فقط امکان فنی تولید آهن با هیدروژن نیست. قیمت تمام‌شده هیدروژن، ضریب دسترسی کارخانه، ظرفیت شبکه برق، نحوه ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن و قیمت محصول نهایی، همگی تعیین‌کننده‌اند.

چرا کیفیت سنگ‌آهن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؟

یکی از چالش‌های کمتر دیده‌شده در توسعه DRI هیدروژنی، کیفیت ماده اولیه است.

فرایندهای متداول DRI و بسیاری از نسل‌های اولیه H -DRI به خوراکی با عیار آهن بالا نیاز دارند. worldsteel اعلام کرده است که این فرایندها معمولاً به سنگ‌آهن با حداقل حدود ۶۴ درصد آهن نیاز دارند، درحالی‌که مواد اولیه دارای چنین کیفیتی کمتر از ۲۰ درصد عرضه جهانی سنگ‌آهن را تشکیل می‌دهند.

این محدودیت می‌تواند پیامدهای مهمی داشته باشد:

- افزایش تقاضا برای کنسانتره و گندله با عیار بالا؛
- افزایش هزینه پرعیارسازی؛
- حساسیت بیشتر به سیلیس، آلومینا و سایر باطله‌ها؛
- افزایش اهمیت کنترل کیفیت گندله؛
- نیاز به توسعه فناوری‌هایی که خوراک با عیار پایین‌تر را نیز بپذیرند.

در نتیجه، پروژه فولاد کم‌کربن فقط پروژه واحد احیا یا فولادسازی نیست. معدن، کنسانتره‌سازی، گندله‌سازی، تأمین انرژی و لجستیک نیز بخشی از همان پروژه‌اند.

آیا افزایش سهم قراضه کافی است؟

کوره قوس الکتریکی مبتنی بر قراضه، در صورت استفاده از برق کم‌کربن، یکی از کم‌انتشارترین روش‌های تولید فولاد است.

شدت انتشار CO مسیر Scrap-EAF در داده‌های worldsteel ۲۰۲۴ حدود ۰٫۶۹ تن CO به ازای هر تن فولاد خام بوده است؛ شاخص گسترده‌تر گازهای گلخانه‌ای نیز حدود ۰٫۷۱ تن معادل CO گزارش شده است.

بااین‌حال، افزایش سهم قراضه محدودیت‌هایی دارد:

- حجم قراضه قابل‌جمع‌آوری نامحدود نیست؛
- کیفیت قراضه‌ها یکسان نیست؛
- عناصر باقیمانده مانند مس و قلع می‌توانند کیفیت محصول را محدود کنند؛
- برخی گریدهای فولادی همچنان به آهن بکر نیاز دارند؛
- رشد تقاضای جهانی باعث می‌شود تولید فقط با بازیافت پاسخ‌گوی کل بازار نباشد.

worldsteel برآورد می‌کند که باوجود افزایش دسترسی به قراضه، تا سال ۲۰۵۰ تقریباً نیمی از تولید فولاد همچنان به آهن تولیدشده از سنگ‌آهن وابسته خواهد بود.

پس توسعه بازیافت ضروری است، اما جایگزین کامل توسعه فناوری احیای کم‌کربن نمی‌شود.

برق کم‌کربن؛ حلقه‌ای که نباید فراموش شود

کوره قوس الکتریکی و الکترولایزر تولید هیدروژن هر دو مصرف‌کنندگان بزرگ برق‌اند. اگر این برق از نیروگاه‌های پرکربن تأمین شود، بخشی از انتشار از داخل کارخانه به شبکه برق منتقل می‌شود.

به همین دلیل باید میان دو مفهوم تفاوت گذاشت:

- **الکتریکی‌کردن فرایند**
- **کاهش واقعی انتشار فرایند**

الکتریکی‌شدن فقط زمانی کاهش عمیق انتشار ایجاد می‌کند که برق مصرفی نیز از منابع کم‌کربن، پایدار و قابل

اتکا تأمین شود.

IEA پیش‌تر نشان داده بود که توسعه جهانی احیای مستقیم هیدروژنی می‌تواند تقاضای برق بسیار بزرگی برای تولید هیدروژن ایجاد کند؛ در سناریوی توسعه پایدار این سازمان، مصرف برق مرتبط با هیدروژن فولاد تا سال ۲۰۵۰ به صدها تراوات‌ساعت می‌رسد.

در نتیجه، قراردادهای بلندمدت برق، توسعه انرژی تجدیدپذیر، ذخیره‌سازی انرژی و پایداری شبکه بخشی از تصمیم فولادسازی محسوب می‌شوند.

کدام مسیر برای کارخانه‌های DRI مناسب‌تر است؟

برای تولیدکننده‌ای که از قبل دارای واحد احیای مستقیم گازمحور و کوره قوس است، یک گذار مرحله‌ای می‌تواند منطقی‌تر از تغییر ناگهانی کل فناوری باشد.

مرحله اول: اندازه‌گیری دقیق

پیش از هر سرمایه‌گذاری باید تراز واقعی انرژی و انتشار کارخانه مشخص شود:

- مصرف گاز به ازای هر تن DRI؛
- مصرف برق کوره قوس؛
- مصرف الکترود و مواد کربنی؛
- درصد متالیزاسیون؛
- کربن آهن اسفنجی؛
- نرخ مصرف اکسیژن؛
- سهم قراضه؛
- کیفیت گندله؛
- انتشار مستقیم و غیرمستقیم.

بدون خط مبنای دقیق، ارزیابی نتیجه پروژه‌های کاهش انتشار قابل اعتماد نخواهد بود.

مرحله دوم: بهینه‌سازی دارایی‌های موجود

اقداماتی مانند افزایش پایداری واحد احیا، کاهش نوسان کیفیت خوراک، بازیافت حرارت، شارژ گرم DRI، بهبود کنترل کوره قوس و کاهش زمان Tap-to-Tap می‌توانند پیش از ورود گسترده هیدروژن، مصرف انرژی و انتشار را کاهش دهند.

مرحله سوم: آماده‌سازی برای ترکیب هیدروژن

در این مرحله باید رفتار واحد احیا با درصدهای مختلف هیدروژن بررسی شود. افزایش سهم هیدروژن روی انتقال حرارت، سینتیک احیا، دمای گاز، کیفیت محصول و بهره‌برداری تجهیزات اثر می‌گذارد.

مرحله چهارم: توسعه هیدروژن کم‌کربن

تزریق هیدروژن زمانی ارزش اقلیمی واقعی دارد که روش تولید آن نیز کم‌کربن باشد. استفاده از هیدروژن تولیدشده با برق پرکربن ممکن است فقط محل انتشار را تغییر دهد.

نتیجه‌گیری

مسیر کاهش انتشار فولاد از یک تجهیز خاص آغاز نمی‌شود؛ از شناخت دقیق وضعیت موجود آغاز می‌شود.

برای مجتمع‌های BF-BOF، فناوری‌هایی مانند بازیافت گاز، تزریق هیدروژن، سوخت‌های جایگزین و CCUS اهمیت دارند. برای کارخانه‌های DRI-EAF، فرصت مهم در بهینه‌سازی زنجیره موجود، افزایش سهم برق کم‌کربن و حرکت تدریجی از گاز طبیعی به هیدروژن نهفته است.

اما در هر دو مسیر، چهار عامل تعیین‌کننده باقی می‌مانند:

- انرژی کم‌کربن و قابل اتکا؛
- ماده اولیه مناسب؛
- سرمایه‌گذاری بلندمدت؛
- نیروی انسانی و دانش فنی.

فولاد کم‌کربن یک پروژه منفرد نیست؛ برنامه‌ای چندساله برای تحول هم‌زمان فناوری، انرژی، مواد اولیه و مدل

کسب‌وکار است.

منابع اصلی مقاله

این مقاله ترجمه مستقیم یک متن واحد نیست و بر پایه تحلیل و بازنویسی منابع رسمی زیر تهیه شده است:

- گزارش Steel – Breakthrough Agenda Report 2025 آژانس بین‌المللی انرژی
- گزارش Climate Change and the Production of Iron and Steel 2025 انجمن جهانی فولاد
- گزارش Sustainability Indicators انجمن جهانی فولاد
- نقشه راه فناوری آهن و فولاد آژانس بین‌المللی انرژی

نسخه آنلاین مقاله: https://landing.steelexperts.ir/2026/07/27/low-carbon-steel-bf-bof-dri-eaf-hydrogen/

SteelExperts.ir